



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# NÁVRH A REALIZACE PRACOVISTĚ "TEPLOTA V TRUBCE"

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2612 – Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy  
*Autor práce:* **Martin Vít**  
*Vedoucí práce:* Ing. Petr Školník, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# DESIGN AND REALIZATION OF THE "AIR HEATER" LAB STATION

**Bachelor thesis**

*Study programme:* B2612 – Electrical Engineering and Informatics  
*Study branch:* 2612R011 – Electronic Information and Control Systems  
*Author:* **Martin Vít**  
*Supervisor:* Ing. Petr Školník, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Vít**  
Osobní číslo: **M11000182**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**  
Název tématu: **Návrh a realizace pracoviště "teplota v trubce"**  
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte návrh laboratorní úlohy "teplota v trubce".
2. Vyberte vhodné součástky pro realizaci (akční členy, sensory, atd.).
3. Zkonstruuje laboratorní úlohu.
4. Ověřte její funkčnost.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 30–40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] HW.CZ. Vše o elektronice a programování [online]. 2013 [cit. 2013-09-20]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/>
- [2] Lab Station: Air Heater [online]. 2013 [cit. 2013-09-20]. Dostupné z: [http://home.hit.no/finnh/air\\_heater/](http://home.hit.no/finnh/air_heater/)
- [3] DIEDRICH, Kurt. Elektronika tajemství zbavená: objevovat, experimentovat, porozumět. 1. čes. vyd. Překlad Miroslav Hrdina. Ostrava: HEL, 2004, 207 s. ISBN 80-861-6724-0.
- [4] Senzory a převodníky. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 136 s. ISBN 80-010-3123-3.


Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Petr Školník, Ph.D.**


Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2014**

  
prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.  
děkan

L.S.

  
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2013

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

# Abstrakt

Práce má za úkol navrhnout, zkonstruovat a ověřit novou laboratorní úlohu „teplota v trubce“, která by měla být použita pro projekt iLab na TUL.

Úloha by měla sloužit jako učební pomůcka při cvičení řízení a regulace.

Konstrukce úlohy by měla umožnit ovládání úlohy, bezobslužný provoz a vytvořit prostor pro možnosti vzdáleného řízení jednotlivých ovládacích prvků spolu s monitorováním aktuálního stavu.

Cílem práce je navrhnout vhodnou součástkovou základnu, navrhnout finální konstrukci úlohy, realizovat ji a ověřit činnost.

## Klíčová slova:

teplota, dynamická soustava, laboratorní úloha

# Abstract

The Thesis is focused on design, construction and testing of a new laboratory exercise "Air Heater", which should be used for the project "iLab" at the Technical University in Liberec.

The Thesis should be used for the purposes of education, during control and regulation training.

In the Thesis, there are described the possibilities of job control and unattended operation. Besides, the interest is paid to the remote control of individual control elements along with monitoring current status.

The aim of the Thesis is to suggest a suitable component base and the final construction of the task. The other aim is to realize the above mentioned task and verify its operation.

## Key words:

temperature, dynamic system, laboratory exercise

# Poděkování

Rád bych věnoval poděkování panu Ing. Petru Školníkovi, Ph.D. za jeho cenné rady, podporu a kladný přístup k této bakalářské práci.

# Obsah

Úvod.....	10
<b>1 Návrh úlohy.....</b>	<b>11</b>
1.1 Analýza problému.....	11
1.1.1 Požadavky na funkci.....	11
1.1.2 Objekt dynamického systému.....	11
1.1.3 Volba media .....	11
1.1.4 Dynamická změna teploty .....	12
1.1.5 Dynamická výměna media .....	13
1.1.6 Volba obalu soustavy .....	14
1.1.7 Shrnutí konstrukce systému.....	15
1.2 Provedení.....	15
1.2.1 Základní deska.....	15
1.2.2 Elektrické obvody.....	15
1.2.3 Rozvržení úlohy .....	16
1.2.4 Důležité konstrukční doplňky.....	16
1.2.5 Shrnutí provedení systému .....	16
1.3 Elektrické ovládání .....	17
1.3.1 Elektrické ovládání topného výkonu .....	17
1.3.2 Elektrické ovládání průtoku vzduchu .....	19
1.3.3 Shrnutí elektrického ovládání.....	19
1.4 Elektrické měření .....	19
1.4.1 Čidla a umístění.....	19
1.4.2 Měřicí elektronika .....	20
1.5 Vizualizace.....	21
1.5.1 Vizualizace topného výkonu .....	21
1.5.2 Vizualizace proudění teplého vzduchu .....	21
<b>2 Realizace úlohy.....</b>	<b>23</b>
2.1 Napájení .....	23
2.2 Ovládání.....	24



2.2.1 Ovládání žárovek .....	24
2.2.2 Ovládání větráku .....	25
2.2.3 Řídicí díl .....	27
2.3 Měření .....	29
2.3.1 Měření teploty .....	29
2.3.2 Měřicí díl .....	29
2.4 Konstrukce .....	31
2.4.1 Rozložení úlohy .....	31
2.5 Vizualizace .....	33
2.5.1 Provedení .....	33
2.5.2 Realizace .....	33
2.5.3 Výpočet součástek .....	33
<b>3 Ověření činnosti .....</b>	<b>36</b>
3.1 Ověření dynamiky systému .....	36
3.2 Výsledné zpracování .....	38
<b>4 Závěr .....</b>	<b>40</b>
4.1 Porovnání výsledku se zadáním .....	40
4.2 Přínos úlohy .....	40
<b>Seznam použité literatury a dalších pramenů .....</b>	<b>41</b>
<b>Přílohy .....</b>	<b>41</b>
Příložený CD-ROM .....	41

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Navrhovaný zdroj tepla - halogenová žárovka .....	13
Obrázek 2: Problém termosifonu u vodorovně položené trubky s pomalým médiem .....	14
Obrázek 3: Rozložení klíčových částí na základní desce .....	16
Obrázek 4: Princip spínání tyristorem .....	18
Obrázek 5: Princip spínání tranzistorem na vysoké frekvenci .....	18
Obrázek 6: Měření proudu čidlem .....	20
Obrázek 7: Měření napětí na referenčním rezistoru .....	20
Obrázek 8: Nejvhodnější konstrukce měřidla .....	21
Obrázek 9: Topologie zapojení síťového napětí .....	23
Obrázek 10. Schéma regulátoru žárovek .....	24

Obrázek 11: Průběh napětí na výstupu komparátoru (červená) a na výstupu integrátoru (zelená) .	25
Obrázek 12: Princip PWM a změna střední hodnoty napětí (fialová) .....	25
Obrázek 13: Ovládání výkonu větráku .....	26
Obrázek 14: Plošný spoj řídicího dílu (strana součástek) .....	27
Obrázek 15: Schéma ovládání .....	28
Obrázek 16: Plošný spoj měřicího dílu (strana součástek) .....	29
Obrázek 17: Schéma měřicího dílu.....	30
Obrázek 18: Objímka pro uchycení trubky.....	31
Obrázek 19: Základní rozměry úlohy .....	32
Obrázek 20: Místa odběru dat pro vizualizaci teploty .....	33
Obrázek 21: Zapojení LED zobrazovačů.....	35
Obrázek 22: Celkový pohled na úlohu .....	38
Obrázek 23: Pohled na úlohu shora .....	39
Obrázek 24: Detail provedení topidla.....	39

## Seznam grafů

Graf 1: Odezva systému na skokové změny výkonu topného tělesa .....	36
Graf 2: Odezva systému na jednotkový skok .....	37
Graf 3: Statická převodní charakteristika systému .....	37

## Seznam zkratek

TUL	Technická univerzita v Liberci
PLC	Průmyslový řídicí počítač
NTC	Teplotní čidlo s negativní závislostí
OZ	Operační zesilovač
PTC	Teplotní čidlo s pozitivní závislostí
DPS	Deska plošných spojů
$I_f$	Proud diodou v propustném směru
$I_{ds}$	Proud dreinovým obvodem unipolárního tranzistoru
$U_{ds}$	Napětí mezi drain a source tranzistoru
$U_{ce0}$	Napětí mezi kolektorem a emitorem bipolárního tranzistoru v oblasti saturace
PWM	Pulsně – šířková modulace

# Úvod

Fyzikální model dynamického systému, který vzniká v rámci této práce, bude nasazen v laboratoři se vzdáleným přístupem iLab, která vzniká v rámci evropského projektu „Modernizace didaktických metod a inovace výuky technických předmětů“ a bude sloužit pro ověření teoretických znalostí studentů, kteří navštěvují předměty zabývající se řízením automatických systémů. Práce je zpracována pro projekt „Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost“. Číslo programu: CZ.1.07/2.2.00/28.0050

Jako vhodný objekt pro dynamický děj byl vedoucím práce doporučen systém ohřevu media v trubce a měření změny teploty na několika místech trubky. Tato úloha byla inspirována již funkční úlohou [2] na Høgskolen i Telemark v Norsku.

Na začátku trubky by se mělo medium pomocí vhodného topného tělesa ohřívat. Poté by mělo být pomocí vhodného pohonu posouváno trubkou a na jednotlivých místech trubky měřena jeho teplota. Tím se získá údaj o pohybu teplotní vlny. Kvůli vzdálenému přístupu by měla být navíc mimo napěťových výstupů provedena i rychlá intuitivní vizualizace aktuálního stavu pomocí vhodného řešení.

Pro potřeby projektu iLab bude úloha osazena řídicími vstupy a výstupy na úrovních 0-10 V. Tyto úrovně jsou standardní pro většinu měřících a řídicích systémů. Je předpokládáno i snímání úlohy kamerou a přenos obrazu na vzdálené nadřazené pracoviště. Úloha bude s největší pravděpodobností řízena počítačovou měřicí kartou nebo průmyslovým PLC.

Praktická část práce se bude zabývat zejména konstrukcí této úlohy, použitými technologiemi, materiály a myšlenkami k co největší užitečnosti výrobku.

K dosažení stanovených cílů jsou v teoretické části zpracovány návrhy různých alternativních řešení a důvody pro použití konkrétní alternativy. Ostatní technologie jsou popisovány na základě osobních vědomostí, zkušeností nebo za pomoci uvedené literatury.

Pro správné pochopení této práce jsou potřebné alespoň minimální znalosti v oblasti chování systémů a elektroniky.

# 1 Návrh úlohy

## 1.1 Analýza problému

### 1.1.1 Požadavky na funkci

Po hlubší úvaze a následné diskuzi s vedoucím projektu byl problém konzultován ještě s několika dalšími vyučujícími, kteří budou úlohu využívat. Byly zjištěny tyto požadavky.

- **Objekt dynamického systému**

Bezpečným a názorným způsobem realizovat skutečný dynamický systém.

- **Robustnost provedení**

Úloha by měla být instalována na pevné základní desce, aby byla mechanicky odolná.

Provedení by mělo být maximálně názorné.

- **Možnost elektrického ovládání a měření**

Pomocí vodičů realizovat ovládání elektrickými signály, které přicházejí z nadřazeného řídicího systému. Vhodným způsobem zjišťovat stav systému v závislosti na čase.

- **Ekonomická optimalizace**

Pro co nejefektivnější využití vložených prostředků.

### 1.1.2 Objekt dynamického systému

Úkolem je realizovat bezpečný a skutečný dynamický systém, který by bylo možné jednoduše řídit a jednoduše zjišťovat jeho stav. Výrazem „bezpečný“ je myšlena skutečnost co nejvíce eliminovat výskyt nežádoucích stavů, poruch a omezit tak vznik nebezpečí spojených s provozem zařízení.

### 1.1.3 Volba media

Z důvodu bezpečnostní podmínky je nutno použít obecně bezpečné, levné a dobře dostupné medium. V neposlední řadě musí být zajištěna funkčnost.

Jako první vhodné medium se jeví voda. Je lehce dostupná a velmi dobře přenáší fyzikální účinky. Práce s ní však není v kombinaci s elektrickým proudem zcela bezpečná, zato však velmi dobře vizuálně znázorňuje prováděné operace. Další nevýhodou vody je nebezpečí jejího úniku, případně nutnost jejího doplňování, což není plně v souladu s požadavkem na bezobslužný provoz.

Jako druhé možné medium se jeví vzduch. Dostupný je prakticky neomezeně a zadarmo. Avšak vzduch není ideální kapalina a nepřenáší fyzikální účinky tak dobře jako voda. Bezpečností však vzduch vyniká [1].

Alternativně by bylo možno použít i pevný materiál (blok oceli, blok betonu), jiné kapaliny (např. olej, líh) nebo i jiné plyny (např. dusík). Práce s těmito látkami však není tak triviální a bezpečná jako u dvou výše zmíněných. V případě použití pevné látky je absolutně potlačena možnost pohybu v mediu.

Tabulka 1: Výběr vhodného media

	Voda	Vzduch
Bezpečnost	-	+
Názornost	+	-
Dostupnost	-	+
Přenos fyz. účinků	+	-
<b>Výsledek</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

Jak je zřejmé z tabulky 1, voda i vzduch se jeví jako vhodná. Při zvážení všech možných aspektů však bylo rozhodnuto přiřadit bezpečnosti vyšší prioritu, což mluví ve prospěch vzduchu. Realizace vodní soustavy by mohlo být do budoucna také zajímavé.

#### 1.1.4 Dynamická změna teploty

Po konzultaci s vedoucím práce byly vybrány dvě nejlépe realizovatelné dynamické změny. První vybranou změněnou vlastností je teplota.

Vzduch v soustavě by bylo možno jak chladit, tak ohřívat. Z ekonomického hlediska byla zvolena pouze možnost ohřevu. Tato volba sebou přináší jistá omezení, například při pokojové teplotě není možnost dosáhnout teploty 0 °C, což by se dalo jistě při výuce s výhodou využívat.

Pro vizuální názornost by bylo vhodné zvolit zdroj tepla, na kterém je letmým pohledem odhadnutelné, na jakou část svého maximálního výkonu je aktuálně provozován. Zároveň musí tento zdroj dodávat dostatečný výkon, který je schopen významně ovlivnit stav systému. Z praktických důvodů bude topidlo omezeno pouze na elektrická zařízení. Teplovodní, chemická a jiná topidla nebudou v této úvaze brána v potaz.

V úvahu tedy připadají tři možné zdroje tepla. Prvním zdrojem tepla je **topná spirála**. Topná spirála je k tomuto účelu velmi vhodná svými parametry. Poměr  $\frac{\text{výkon}}{\text{zabraný objem}}$  je velmi příznivý. Bohužel na topné spirále není na první pohled patrné, jakou částí svého výkonu aktuálně topí.

Druhým zdrojem tepla je **klasická žárovka**. Klasická žárovka je obecně známa jako zdroj tepla. Parametr  $\frac{\text{výkon}}{\text{zabraný objem}}$  je však špatný. Odhadneme-li, že výkon běžně dostupné žárovky je 40 W, zabraný objem je 200 cm<sup>3</sup> vychází nám parametr 0,2 W/cm<sup>3</sup>.

Třetím možným zdrojem je **halogenová miniaturní žárovka**. Výkon běžně dostupných halogenových žárovek se pohybuje kolem 60 W. Ve prospěch však mluví objem zabraný topidlem. Odhadneme-li, že miniaturní halogenová žárovka zabere 20 cm<sup>3</sup>, vychází parametr  $\frac{\text{výkon}}{\text{zabraný objem}}$  zhruba 2,5 W/cm<sup>3</sup>, což je nesrovnatelně lepší než u klasické žárovky. Nejideálnějším místem pro umístění žárovky by byla poloha co nejvíce u kraje soustavy. Toto umístění napomůže rovnoměrnému rozšíření efektu po celém systému.

Výhodou halogenové žárovky je navíc přímější charakter závislosti jasů na výkonu. Zatímco klasická žárovka začíná žhnout zhruba od 60 % napětí, halogenová žárovka žhne už při 40 %. Je to způsobeno tím, že má pracovní bod položen ve vyšší teplotě, proto 40 % výkonu halogenové žárovky odpovídá teplotě zhruba 60 % klasické žárovky. Tento efekt je pouze intuitivně odhadnutelný a není možné jej přesně změřit z důvodu individuální reakce lidského oka.

Do úlohy bude proto vybrána jako zdroj tepla halogenová žárovka, která kombinací svých parametrů a vlastností nejlépe odpovídá potřebám žádaného topidla pro konstruovanou úlohu.



*Obrázek 1: Navrhovaný zdroj tepla - halogenová žárovka*

#### 1.1.5 Dynamická výměna media

Druhou dynamickou změnou je výměna media. Pokud bychom žárovkou ohřívali prostor a nedocházelo by k výměně media, mohli bychom soustavu pouze jednou ohřát a následně by se s vzniklým stavem nedalo nic dělat. Je velmi pravděpodobné, že vlivem tepelných ztrát by systém po uvedení do klidového režimu opět vychladl a navrátil se do stavu s možností manipulace. Tato varianta je však silně závislá na stavu okolí a navíc bez možnosti jakkoliv zasahovat do procesu. Je proto nutné zajistit výměnu media nuceným způsobem.

Pro nucenou výměnu byly vybrány dva způsoby. První z nich je založen na principu **termosifonu**. Pro toto uspořádání je nutné, aby bylo medium obaleno do pevného obalu, který by měl na jedné straně vstup čerstvého vzduchu a na druhé výstup odpadního (teplého) vzduchu. Ideálním obalem by byla například trubka. Tato trubka by musela být umístěna kolmo k zemskému povrchu, aby mohl princip termosifonu probíhat – trubka svisle.

Nevýhodou tohoto uspořádání by byl fakt, že množství protékajícího vzduchu by bylo závislé na výkonu topidel a to i pokud bychom použili ve spodní nebo horní části jednoduchou škrticí klapku, která by měnila průřez trubky.

Druhý způsob je založen na principu nuceného proudění, které by bylo vytvořeno **větrákem**. Pro toto uspořádání je rovněž nutné, aby bylo medium obaleno pevným obalem se vstupem čerstvého

vzduchu na jedné straně a výstupem odpadního (teplého) vzduchu na straně druhé. I pro toto uspořádání je vhodným obalem trubka. V tomto případě by mohla být trubka umístěna téměř v libovolné pozici, větrák vyvolá posun vzduchu vždy. Důležité je uvědomit si, že princip termosifonu platí stále a pokud nebude proud vzduchu vytvářený větrákem dostatečný, bude se teplý vzduch držet na vyšších místech, v tomto případě ve vrchní části trubky. Vhodné by bylo použít axiální větrák, který kombinací svých parametrů nejlépe naplňuje kladené nároky, kterými jsou poměr množství a tlaku v závislosti na ceně zařízení.



*Obrázek 2: Problém termosifonu u vodorovně položené trubky s pomalým médiem*

Z těchto dvou předložených řešení se jeví jako výhodnější použití větráku. Vybereme proto pro konstrukci úlohy tuto variantu, která plně splňuje všechny požadavky, a nevznikají nežádoucí problémy, jako v případě použití principu termosifonu.

#### **1.1.6 Volba obalu soustavy**

Jak už bylo uvedeno výše, nejjednodušším řešením je zřejmě použití trubky. Bylo by sice možno slepit z obdélníků kanál, ale výsledný efekt by za to bez použití speciálních dílenských přípravků nestál. Zvláště pokud je trubka běžně dostupná na trhu.

Aby nebyla porušena názornost příkonu dodávaného žárovkami, která je signalizována jejich jasnem, bylo by vhodné použít trubku průsvitnou, nebo ještě lépe průhlednou. Tyto trubky jsou na trhu běžně dostupné. Jsou vyráběny z polymethylmethakrylátu známého jako **plexisklo**. Teplota tání tohoto materiálu je 160 °C. Bylo by sice technologicky možné použít i skleněné trubky, ale výrazně by se ztížila montáž, obrábění materiálu, stoupla by cenová náročnost a výrobek by se stal celkově méně odolný. Přičemž skleněné trubky takto velkých průměrů nejsou na trhu běžně dostupné. Plexisklo má navíc oproti sklu výhodu nízké tepelné vodivosti a kapacity a tím bude méně ovlivňovat měřené medium.

Výška patice spolu s výškou žárovky je 28 mm. Nosník, na kterém budou žárovky upevněny, má výšku 10 mm a je umístěn 2 mm nad stěnou trubky. Z toho vyplývá minimální konstrukční výška 40 mm. Vhodné by bylo zvolit průměr trubky větší, než je minimální možný průměr, aby nedocházelo k tavení plastu.

Po konzultaci s vedoucím práce byla zvolena trubka o průměru 100 mm a tloušťkou stěny 3 mm. Vnitřní průměr je tedy 94 mm.

### 1.1.7 Shrnutí konstrukce systému

Základní částí objektu bude plexi trubka s vnitřním průměrem 94 mm, která bude protékána proudem vzduchu. Tento vzduch bude trubkou proháněn axiálním větrákem vhodné síly a velikosti. Vzduch bude ohříván halogenovým žárovkovým topným tělesem, umístěným přímo v trubce.

## 1.2 Provedení

### 1.2.1 Základní deska

Celé zařízení by mělo být umístěno na jedné desce, aby ho bylo možné přenést. Pro nejoptimálnější využití plochy se nabízí čtvercový tvar. Zařízení by mělo být tak velké, aby se bez problému vešlo na školní lavici. Byla proto zvolena délka strany odpovídající otevřenému sešitu formátu A4, což je 420 mm.

Materiál, který se s výhodou k takovýmto účelům používá, je laminovaná **dřevotříska**. Bylo by možno použít i jiné materiály, mezi nimiž figuruje zejména základna ze dřeva, plexiskla, polystyrenu, nebo kovová konstrukce. Laminovanou dřevotřísku je však možno nechat si uříznout přesně na míru, což je u většiny materiálů komplikované. Oproti dřevu vyniká možností snadnější údržby laminovaného povrchu. Nevýhodou dřevotřísky je její poměrně velká hmotnost. V tomto případě však váha není na škodu, úloha bude díky tomu stabilnější.

### 1.2.2 Elektrické obvody

Aby bylo možno zařízení ovládat a měřit jeho chování, musí v něm být obsažena řídicí a měřicí část. K těmto dvěma částem zprostředkovávajících přenos informace je navíc potřeba doplnit vhodný zdroj upravující vlastnosti elektrické energie z veřejné sítě. Pro splnění bezpečnostní normy je nutné, aby napětí tohoto zdroje bylo nižší než 60 V, protože u výstupu je reálná šance dotyku obsluhy s živou částí. Výhodou pro měření a další zvýšení bezpečnosti je i zařízení plně galvanicky oddělené od síťové soustavy na úrovni bezpečnostního oddělovacího transformátoru. Jako vhodná volba se jeví průmyslově vyráběný adapter, jehož součástí je plně galvanicky oddělený transformátor, stabilizátor napětí a příslušející filtrace. Takovýto adapter je na trhu běžně dostupný. Tento adapter se dá při svých parametrech použít zároveň i jako napájecí zdroj pro desku vizualizace. Protože však deska vizualizace má maximální spotřebu 650 mA a spotřeba větráku je zhruba 200 mA, je třeba použít zdroj s minimální proudovou zatížitelností 900 mA. Vhodnější by však bylo použít zdroj dodávající 1 A, aby vznikla aspoň minimální rezerva. S ohledem na řídicí vstupy, které mají rozsah 0-10 V a katalogové hodnoty použitých součástek se jako nejvhodnější napájecí napětí jeví 12 V.

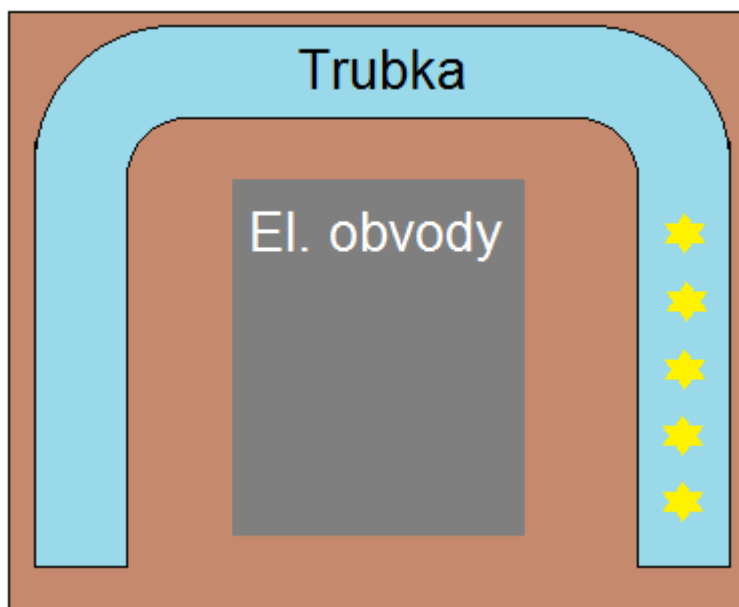
Celý tento systém musí být chráněn před nechtěným zásahem zvenčí, který by mohl mít za následek úraz obsluhy nebo zničení zařízení úlohy. Nejvhodnější by bylo použít konvenční elektroinstalační krabici ze samozhášivého nevodivého materiálu, která je běžně dostupná na trhu. Bylo by sice možné použít i plechovou, nebo krabici, tato řešení jsou však ekonomicky nevýhodná a plechová krabice navíc zvyšuje riziko zásahu elektrickým proudem.



### 1.2.3 Rozvržení úlohy

Celá úloha má být po svém vytvoření schopna dálkového provozu, se vzdáleným řídicím pracovištěm. Přístup k úloze bude zřejmě realizován pomocí průmyslového PLC. Pro potřeby vzdáleného řízení by úloha měla být vybavena kamerou pro kontrolu právě probíhajícího děje. Nejjednodušším řešením je využití webkamery. Běžně dostupné webkamery mají obdélníkový tvar obrazu, což se hodí pro snímání úlohy shora. Je proto nutné, aby byly součástí úlohy rozmístěny na základní desce v takové poloze, aby se při pohledu shora nic nepřekrývalo a vše bylo dobře vidět.

Protože trubka má poměrně velký průměr a celou její 1/3 délky zabírají žárovky, jeví se jako nejvhodnější řešení zpracovat trubku do tvaru písmene „U“. Na jednom konci bude vstup čerstvého vzduchu a na druhém výstup odpadního (teplého) vzduchu. Ve vzniklém prostoru uprostřed bude umístěna řídicí a měřicí elektronika se zdrojem v elektroinstalační krabici.



Obrázek 3: Rozložení klíčových částí na základní desce

### 1.2.4 Důležité konstrukční doplňky

Aby byla zajištěna lepší stabilita úlohy, bylo by vhodné namontovat na desku krátké nohy. Trubku je nutné uchytit tak, aby bylo zamezeno poškozování vlivem teplotních dilatací, které jsou u plastu značné.

### 1.2.5 Shrnutí provedení systému

Úloha bude instalována na dřevotřískové základní desce. Trubka systému bude tvarována po obvodu základové desky do tvaru písmene U. Ve vzniklém prostoru uprostřed bude umístěna ochranná krabice s elektrickými součástkami [2], tak jak je znázorněno na obrázku 3.

## 1.3 Elektrické ovládání

Po konzultaci s vedoucím práce bylo určeno, že ovládání a měření na zařízení bude provedeno elektrickými signály na principu spojitých napěťových signálů s rozsahem 0-10 V. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu masového nasazení měřicích karet v laboratoři spojitého řízení. Tyto karty disponují právě napěťovými vstupy a výstupy s rozsahem 0-10 V. Tento režim práce a rozsah je také průmyslovým standardem pro většinu měřicích a řídicích systémů.

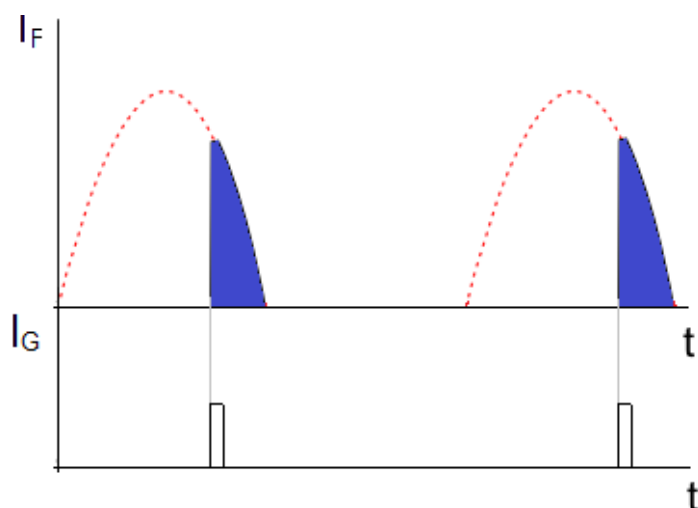
### 1.3.1 Elektrické ovládání topného výkonu

Odhadnutý výkon topidel se pohybuje okolo výkonu 250 W. Tento odhad je založen na zkušenosti s ručním sušičem vlasů – fénem.

Výkon 250 W je už poměrně značný. Při síťovém napětí odpovídá tomuto výkonu příslušející proud téměř 1,1 A. Při použití nižších bezpečných napětí jako jsou napětí 24 V a 12 V by byly tyto proudy ještě mnohem větší. V případě 24 V by to byl proud 10,41 A a v případě 12 V dokonce 20,83 A. Práce s takto vysokými proudy je velmi náročná a neefektivní. Zdroje dodávající takto vysoké proudy jsou navíc drahé a zabírají velký prostor. Proto byly jako topné těleso zvoleny halogenové žárovky se jmenovitým napájecím napětím 230 V. Uvedené řešení všechny popsané nedostatky práce s malým napětím dostatečně potlačí.

Jako nejjednodušší varianta se jeví ovládání výkonu žárovek pomocí **přivírání tranzistoru**. Tato varianta je teoreticky ještě na hranici realizovatelnosti z hlediska parametrů součástek i spotřebovaného místa, ale z hlediska účinnosti zařízení je tato varianta naprosto nevyhovující. Pokud bychom zjednodušili žárovku na lineární odpor, měl by hodnotu 211,6  $\Omega$ . Při polovičním výkonu by na něm bylo napětí 156 V a procházející proud 0,74 A, na tranzistor by poté zbylo napětí 74 V při stejném proudu, což vytváří požadavek na chladič 55 W. Tento chladič by musel mít odpovídající plochu a musel by být umístěn mimo chráněnou oblast uvnitř elektroinstalační krabice, což značně znesnadňuje provedení. Výhodou tohoto řešení by byla jednoduchost, díky které nám stačí na účinnou regulaci pouze několik málo součástek.

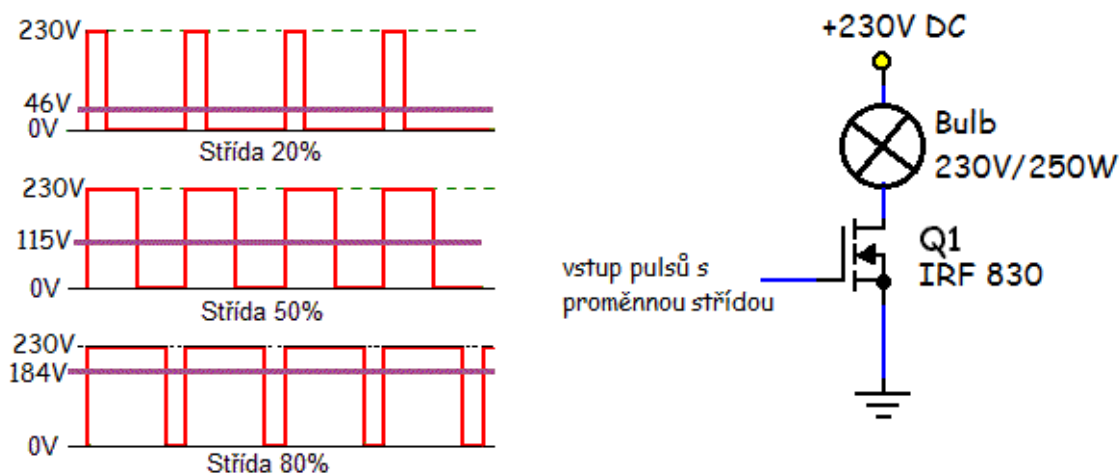
Jako další varianta se jeví použití **tyristoru**. Princip je takový, že se na spotřebič přivede pouze určitá část půlperiody. Tím se reguluje střední hodnota napětí. Regulace tedy probíhá spínáním na frekvenci 50 Hz. Výsledkem tohoto provedení je vznik velkého rušení, které není možné spolehlivě eliminovat. Nevýhodou je také sériový odpor tyristoru, který se pohybuje v řádech desetin ohmu. Při klasickém učebnicovém zapojení lze navíc regulovat výkon v rozsahu 0-50 %. Pro rozsah 0-100 % je třeba řadit dva regulátory antiparalelně. Na obrázku 4 je naznačený časový průběh proudu tyristorem v závislosti na řídicích signálech. Velikost řídicích pulsů se pohybuje v jednotkách miliampér, velikost přenášených proudů od jednotek po stovky ampér. Pro větší výkony se tyristory řadí sériově i paralelně.



Obrázek 4: Princip spínání tyristorem

Jako třetí a v současnosti obecně i nejpoužívanější varianta je **spínání tranzistorem** na vysoké frekvenci. Výhoda tohoto provedení spočívá v jednodušší filtraci vzniklých rušení, protože používané frekvence se pohybují v řádu desítek kHz, takže stačí pouze malá indukčnost na potlačení rušení a zajištění dobré elektromagnetické kompatibility. Výhoda tohoto řízení spočívá také v regulaci výkonu od 0-100 % a také nižším sériovém odporu tranzistoru, který se pohybuje v miliohmch. Princip, který je naznačen na obrázku 5 je nejjednodušší variantou spínání, kdy je spotřebič zapojen v drainovém obvodu a tranzistor pracuje s plovoucí zemí spotřebiče.

Do spotřebiče vstupuje signál modulovaný vysokou frekvencí. Spotřebič však na tuto frekvenci nestačí reagovat díky své dlouhé časové konstantě. Tato konstanta se u žárovek pohybuje v řádu sekund. Výsledkem je, že výstupní světelný tok je stabilně úměrný střední hodnotě modulovaného napětí (na obrázku 5 vyznačeno fialovou čarou). Pro některé rychlé systémy je tento druh řízení nevhodný. Pokud je řízený systém dostatečně rychlý, projeví se modulace na výstupu spotřebiče, což je nežádoucí. Příkladem takového rychlého systému jsou například audio systémy.



Obrázek 5: Princip spínání tranzistorem na vysoké frekvenci

### 1.3.2 Elektrické ovládání průtoku vzduchu

Průtok vzduchu lze nejlépe ovládat výkonem větráku, který podporuje proudění média. Průtok by sice bylo možno řídit i škrticí klapkou na konci vedení, toto řešení by však mělo za následek podstatnou změnu tlaku vzduchu v trubce a tím i změnu jeho teplotní kapacity. Proto je vhodnější ovládat průtok příkonem motoru větráku.

Podle zkušeností z podobných aplikací byl navrhnut k použití větrák z počítače, který má průtok vzduchu rychlostí zhruba 2 m/s. Odběr takového větráku je 150 mA při 12 V.

Bylo by sice možné použít regulaci výkonu pomocí spínání, obdobně jako u žárovek, je však potřeba si uvědomit, že nyní pracujeme s napětím pouze 12 V, takže ztracený výkon při použití tranzistoru v lineární oblasti nebude značný. Teoreticky se na tranzistoru ztratí okolo 0,5 W. Použití lineární regulace je podpořeno skutečností, že při použití jakéhokoliv spínání bychom spínali indukční zátěž, kterou tvoří vinutí motoru. Toto vinutí by vlivem napěťových rázů velmi trpělo.

### 1.3.3 Shrnutí elektrického ovládání

Topidlo bude ovládáno pomocí spínání unipolárním tranzistorem na vysoké frekvenci pro své výhody, mezi něž patří zejména dobrá účinnost, se kterou odpadají nároky na prostorově náročné chlazení. Vstupem ovládání bude napěťová úroveň v rozsahu 0-10 V a výstupem bude napětí modulované spínací frekvencí v rozsahu střední hodnoty 0-230 V.

Větrák bude ovládán tranzistorem v lineárním pracovním režimu. Uvedené řešení bylo zvoleno z důvodu své jednoduchosti. V této situaci není potřeba řešit výkonovou ztrátu na tranzistoru, která se pohybuje maximálně kolem hodnoty 1,5 W a to při zablokovaném nebo spáleném větráku. Tento výkon spolehlivě vyzáří samotné pouzdro tranzistoru připevněné kvůli mechanickým vlastnostem na DPS. Vstupem ovládání bude napěťová úroveň v rozsahu 0-10 V a výstupem bude proud v rozsahu 0-130 mA.

## 1.4 Elektrické měření

### 1.4.1 Čidla a umístění

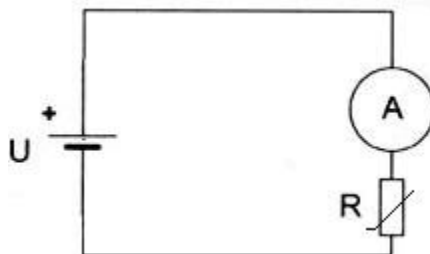
Hlavním prvkem dynamické změny u této soustavy je teplota. Aby bylo možno mapovat pohyb teplého média, je nutné do soustavy umístit několik čidel a sledovat jejich postupnou změnu.

Vhodné je umístit jedno čidlo těsně za vstup, druhé za topidlo, třetí do 1/2 dráhy ohřátého vzduchu a čtvrté k vyústění. Jako čidla byla vedoucím práce doporučena vysoce citlivá KTY 81-120. Což je čidlo PTC s odporem 980-1020  $\Omega$  při 25 °C.

Pro zajímavost bylo doporučeno do jednoho měřicího bodu umístit dvě čidla: čidlo KTY 81 a čidlo NTCM-HP-22k. Druhé uvedené čidlo je nelineární NTC s odporem 22 k $\Omega$  při 25 °C.

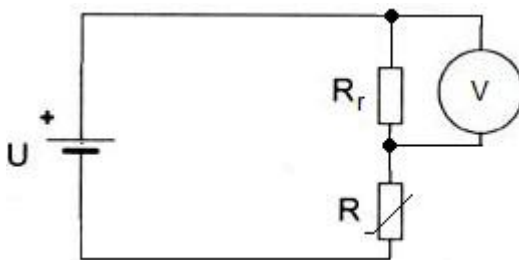
### 1.4.2 Měřicí elektronika

Vyhodnocování údajů z čidel je možno provést různými způsoby. Nejjednodušší by bylo zřejmě měřit proud procházející čidlem, tak jak je naznačeno na obrázku 6. Bohužel by bylo pro tuto metodu nutné, aby se odpor čidla měnil od  $\infty$  do definované hodnoty.



*Obrázek 6: Měření proudu čidlem*

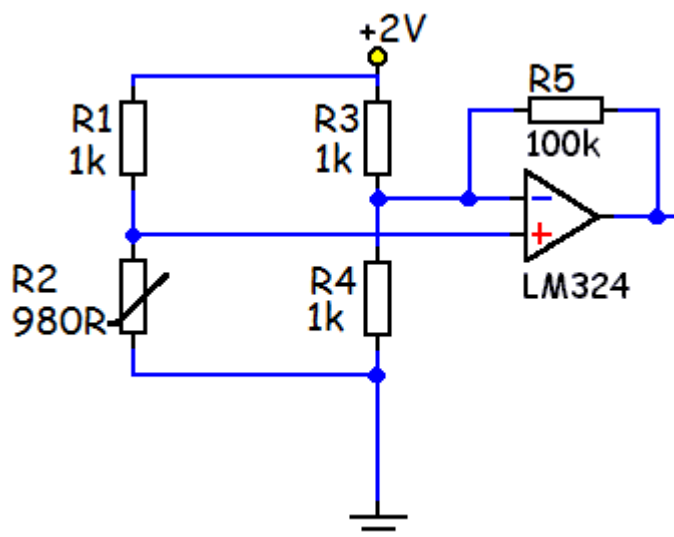
Další možností by bylo měřit napětí na sériově zařazeném referenčním rezistoru (obrázek 7). Toto řešení má nevýhodu v tom, že se napětí na rezistoru mění až od určité hranice. Tato hranice je určena nenulovým odporem při referenční teplotě. Tento problém se dá řešit buď pomocí A/D převodníku s posunutou zemí nebo analogově pomocí měřicího můstku.



*Obrázek 7: Měření napětí na referenčním rezistoru*

U tohoto zapojení použijeme analogový měřicí díl, protože při použití digitalizace by narostl počet součástí a výsledek by byl zhruba stejný, jako při použití čistě analogového řešení.

Pro snímání měřeného napětí tedy využijeme měřicí můstek, k jehož výstupu připojíme zesilovač. Tento zesilovač upraví změnu napětí v řádech desetin voltu z můstku 0-10 V. Okolní rezistory můstku jsou zvoleny shodné s odporem čidla, aby byla největší citlivost můstku. Toto zapojení je nutné zopakovat 5x, aby bylo možno měřit každým snímačem. Podmínkou pro správnou funkci měřicího dílu je i odpovídající zdroj.



Obrázek 8: Nejvhodnější konstrukce měřidla

## 1.5 Vizualizace

### 1.5.1 Vizualizace topného výkonu

Vizualizace vyzářeného výkonu není potřeba dále zlepšovat. Její přímé názornosti je dosaženo použitím žárovek, které přímo vyjadřují svojí svítivostí a barvou přiváděný výkon. Nepříjemností spojenou s tímto řešením je nelineární změna spektra, která je vyjádřena Stefan-Boltzmanovým zákonem podle vztahu (1.1).

$$I = \sigma T^4 \quad (1.1)$$

Pro účely této úlohy zřejmě vizualizace touto nelineární charakteristikou postačí. Nebyla-li by vizualizace dostatečná, je možné doplnit úlohu o sofistikovanější zařízení na zobrazení předaného výkonu. Pro dobrý prostup světla je tepelný-světelný zdroj umístěn v plastové průhledné trubce.

### 1.5.2 Vizualizace proudění teplého vzduchu

Protože teplota vzduchu není lidským okem postřehnutelná, je potřeba vytvořit určitý druh převodníku, který bude nedokonalost lidského oka v tomto ohledu kompenzovat.

První variantou, která připadá v úvahu je **termokamera**. Pokud bychom snímali teplotu vzduchu v trubce termokamerou a jako výstup přímo dostávali obraz, je to zřejmě ten nejlepší a nejkompaktnější způsob vizualizace, jaký můžeme dosáhnout. Bohužel tato metoda není v praxi použitelná, protože termokamerou bychom dokázali sejmout pouze teplotu povrchu trubky a ne teplotu jejího obsahu. Cena termokamery se navíc pohybuje v desítkách tisíc korun, což nejsou adekvátní náklady spojené se zbytkem úlohy.

Druhou variantou jsou **teplotcitlivé barvy**. Tyto barvy mění svůj odstín v závislosti na teplotě okolí. Výhodou je, že je to řešení relativně nenáročné a levné. Nevýhodou je, že tyto barvy mají pro úlohu jen malý rozsah zobrazovaných teplot. Tento problém by se dal řešit použitím několika proužků s barvou. Avšak odečítání teploty by se poté stalo velmi nepřehledným. Nevýhodou těchto barev je také nejednoznačná teplota příslušející odstínu.

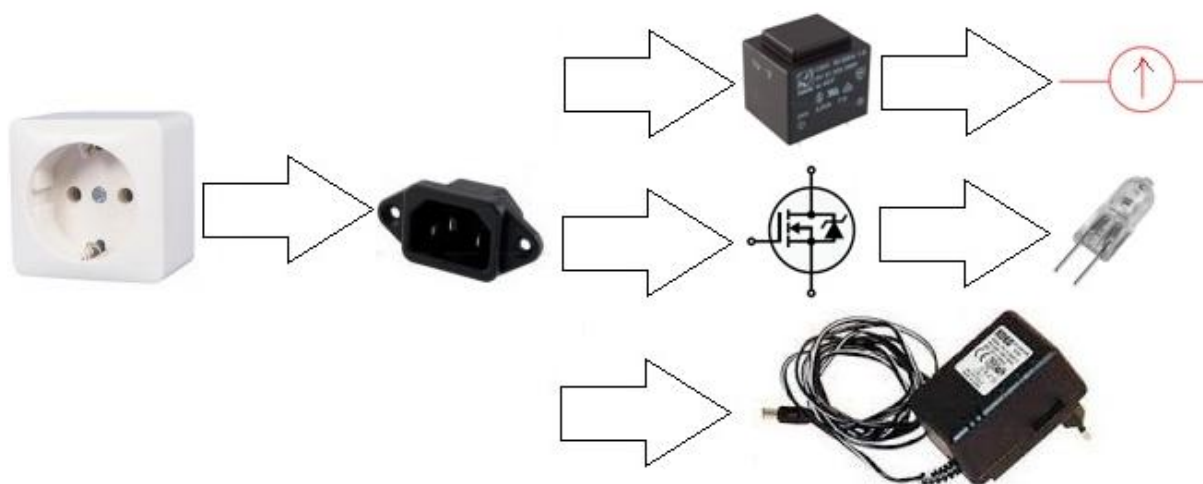
Třetí variantou je použití **LED** zobrazovače jako bargrafu. Napětí z výstupu měřícího obvodu je přivedeno na budicí obvod páskového indikátoru LED. Výhodou tohoto řešení je, že teplota v trubce už je měřena a převedena na napětí k dalšímu zpracování.

Nejvýhodnější je tedy použití LED. Toto řešení zcela splňuje všechny kladené požadavky na zobrazování velikosti teploty. Rozsah je možno libovolně nastavit pomocí příslušné elektroniky, která je určena i k řízení počtu svítících LED. Pro konstrukci úlohy bude vybrána varianta s LED.

## 2 Realizace úlohy

### 2.1 Napájení

Elektrická energie [3] bude do elektroinstalační krabice přivedená zpredu. Z důvodu zajištění bezpečnosti bude použit napájecí euro konektor, do kterého bude přivedeno napájecí napětí pomocí standardizovaného kabelu. Z konektoru se bude vedení větvit do zásuvky s adapterem, který je nutný pro napájení řídicí a informační části zařízení, do PWM modulátoru pro řízení výkonu žárovek a také do měřicí části zařízení, ve které je osazen vlastní lineární zdroj. Popsaná situace je znázorněna na obrázku 9.



Obrázek 9: Topologie zapojení síťového napětí

Pro připojení adaptéru je třeba použít síťovou zásuvku. Z důvodu mechanické stability je nejvhodnější dvojzásuvka. Vznikne tak i rezerva pro případné rozšíření zařízení o PLC.

Adaptér, vzhledem k požadavkům následujících obvodů, musí splňovat parametry 10-12 V/1 A stejnosměrný.

Všechny další součásti zařízení se síťovým napětím budou automaticky předpokládány na napájecí napětí s parametry 230 V/50 Hz.

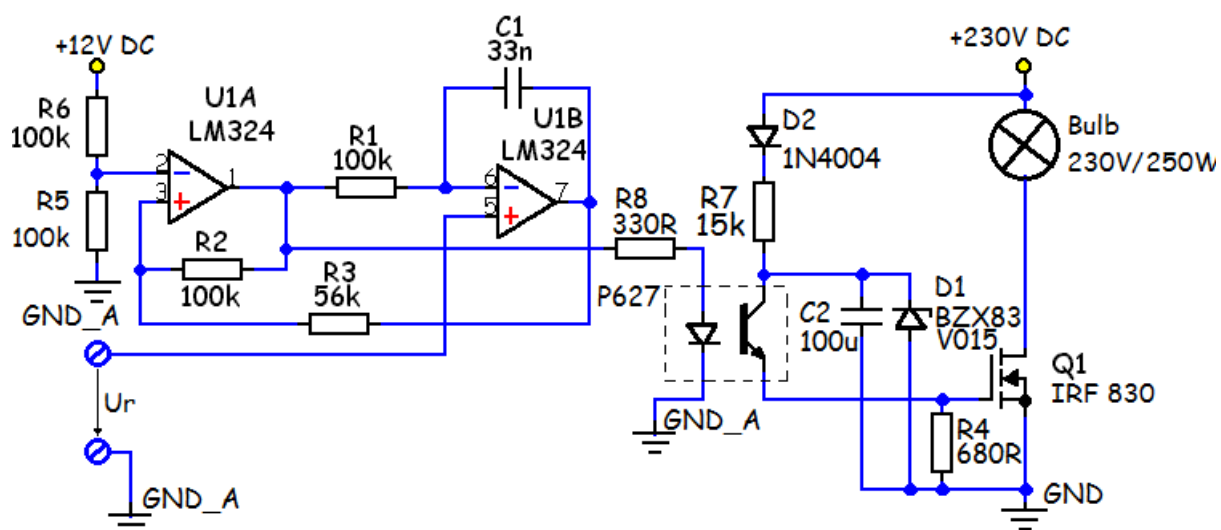


## 2.2 Ovládání

### 2.2.1 Ovládání žárovek

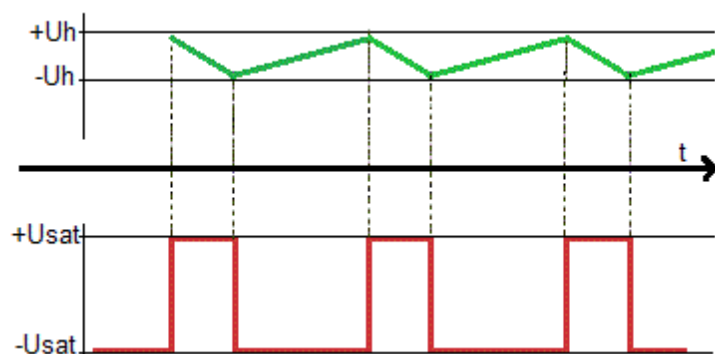
Ovládání žárovek bude řešeno pomocí PWM regulátoru s tranzistorem. Ideální řešení pro konstrukci PWM s dobrou funkcí a možností regulace od 0-100 % nabízí zapojení známé jako funkční generátor nebo generátor obdélník-trojúhelník. K tomuto generátoru bude připojen tranzistor s odpovídajícími vlastnostmi přes rezistor, který omezuje proud vybíjejícího se hradla tranzistoru.

Důležitým funkčním prvkem je optočlen, kterým se oddělí výkonová a řídicí část. Tyto dvě části nesmí být podle norem v žádném případě spojeny, aby nedošlo ke zranění obsluhy nebo zničení nadřazeného zařízení. Princip optočlenu je takový, že se elektrické signály převedou na světelné a poté zpět na elektrické. Tímto je zajištěno naprosto spolehlivé galvanické oddělení částí a zajištěna bezpečnost zařízení. Princip celého zařízení použitého jako PWM modulátor je zobrazeno na obrázku č. 10.



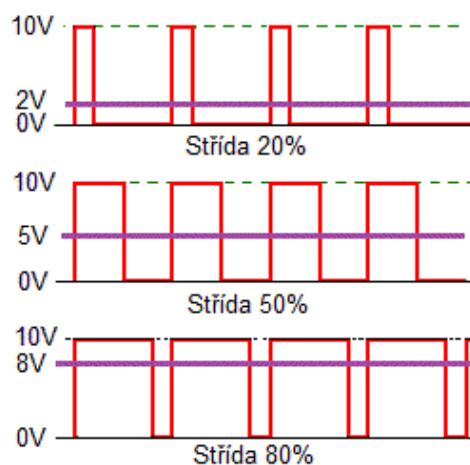
Obrázek 10. Schéma regulátoru žárovek

Obvod skládající se ze dvou zesilovačů mění střidu spínání zhruba na frekvenci 27 kHz. Střída určuje střední hodnotu napětí, která se projeví na žárovce. Obvod U1B funguje jako invertující integrátor. Pokud si představíme, že na jeho vstup (R1) přivedeme  $+U_{sat}$ , bude integrátor odintegrovat směrem k -  $U_{sat}$ . Překročí-li však tato hodnota určitou hranici ( $+U_h$ ) komparátor s hystezí, tvořený zesilovačem U1A, se přepoklopí a přivede na vstup integrátoru nízkou úroveň. Napětí na jeho výstupu začne stoupat a po překročení komparační úrovně U1A ( $-U_h$ ) dojde opět k přepoklopení do kladné úrovně a celý cyklus se opakuje. Průběhy napětí jsou zobrazeny na obrázku 11.



Obrázek 11: Průběh napětí na výstupu komparátoru (červená) a na výstupu integrátoru (zelená)

Napětím  $U_r$  se přičítá k pile absolutní složka a mění se poměr doby pod úrovní komparace a nad úrovní komparace. Přivedeme-li na vstupní svorky 5V, je napětí shodné s referenčním napětím komparátoru a střída je 1:1.



Obrázek 12: Princip PWM a změna střední hodnoty napětí (fialová)

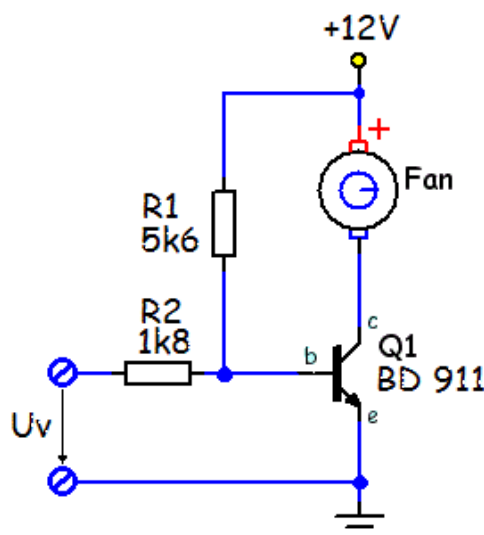
Rozdíl mezi napájecím napětím zesilovačů 12 V a vstupním napětím 0-10 V je způsoben nedokonalostí otevřeného OZ, je zhruba 1,7 V, ale tato hodnota není přesná. Hodnota součástek není kritická a postačí tolerance 5 %. Jedinou věc, kterou je nutné řešit na návrhu, je frekvence spínání. Pro zajištění elektromagnetické kompatibility je nutné zvolit frekvenci, která není násobkem síťové frekvence. Pro 50 Hz je doporučený koeficient 33,2 Hz a jeho vyšší harmonické. Podle doporučení Datasheetu pro tvorbu PWM s obvodem LM324 byla vybrána hodnota 27 kHz. Přesná hodnota by tedy měla být například 26991,6 Hz. S ohledem na teplotní vlastnosti součástek však postačí údaj 27 kHz.

### 2.2.2 Ovládání větráku

Větrák je ovládán pomocí tranzistoru, pracujícího v lineární oblasti [4]. Pro tuto aplikaci se lépe hodí bipolární tranzistor, protože začíná pracovat již od nepatrného řídicího napětí, zhruba okolo 0,5 V.

Pokud by bylo potřeba řešit ovládání přesně, bylo by lepší zařadit před ovládací tranzistor ještě sumátor, a přičíst k ovládacímu napětí  $U_{be}$  tranzistoru. Vzhledem k tomu, že se však větrák začíná točit zhruba od 5 V, je tato drobnost zanedbatelná. Jako řízená veličina bude proud motorem větráku.

Zapojení pracuje podle následujícího principu: Na svorky je přivedeno řídicí napětí  $U_v$ , které je přes rezistor 2000  $\Omega$  převedeno na proud ovládající bázi tranzistoru. K tomuto proudu je navíc připočten proud, který posouvá pracovní bod tranzistoru do pracovní oblasti větráku (obrázek 13). Napětí  $U_{ce0}$  otevřeného tranzistoru je zanedbáno.



Obrázek 13: Ovládání výkonu větráku

#### Výpočet rezistorů:

Zadání: Mějme větrák 12 V/150 mA. Úkolem je ovládat napětím 0-10 V jeho výkon na 0-100 %. Navrhněte schéma a vypočítejte hodnoty vhodných součástek. Větrák se začíná točit při 5 V, napětí  $U_{ce0}$  zanedbejte. Proved'te optimalizaci pro řadu E12.

Zvolen je tranzistor BD911 – jedná se o bipolární výkonový tranzistor typu NPN se zesílením v dané pracovní oblasti  $\beta=30-35\times$

#### Výpočet **R1**:

$$\text{Odpor vinutí větráku:} \quad R_v = \frac{12}{0,15} = 80\Omega \quad (2.1)$$

$$\text{Výpočet minimálního proudu:} \quad I_0 = \frac{U_{v0}}{R_v} = \frac{5}{80} = 62,5\text{mA} \quad (2.2)$$

$$R1 = \frac{U}{I} = \frac{U_{cc} - U_{be}}{\frac{I_0}{\beta}} = \frac{12 - 0,7}{\frac{0,0625}{30}} = 5424\Omega \quad (2.3)$$

Z řady E12 zvolíme rezistor **5k6**

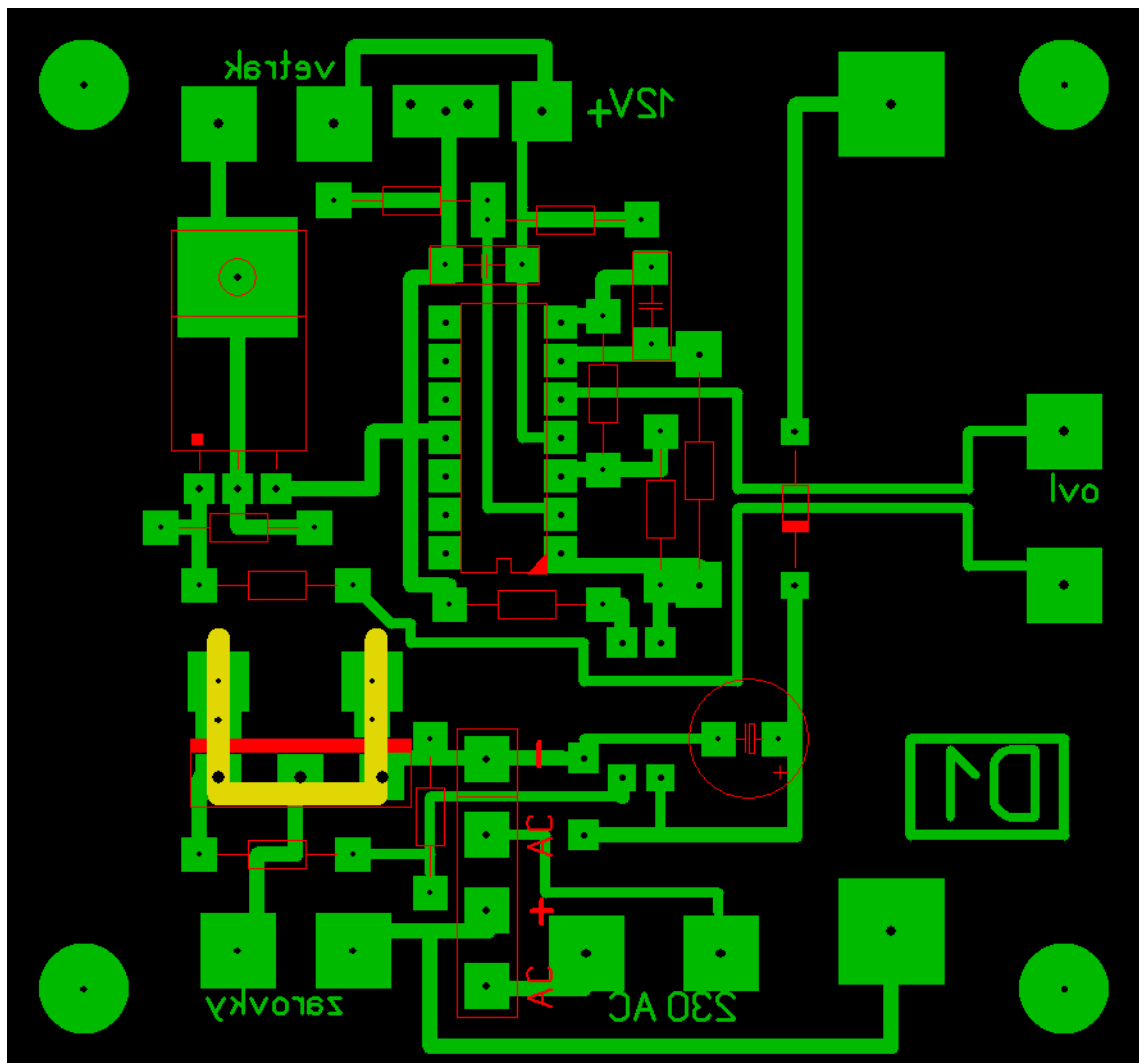
#### Výpočet **R2**:

$$R2 = \frac{U}{I} = \frac{U_v - U_{be}}{\frac{I_{Max}}{\beta}} = \frac{10 - 0,7}{\frac{0,15}{30}} = 1860 \Omega \quad (2.4)$$

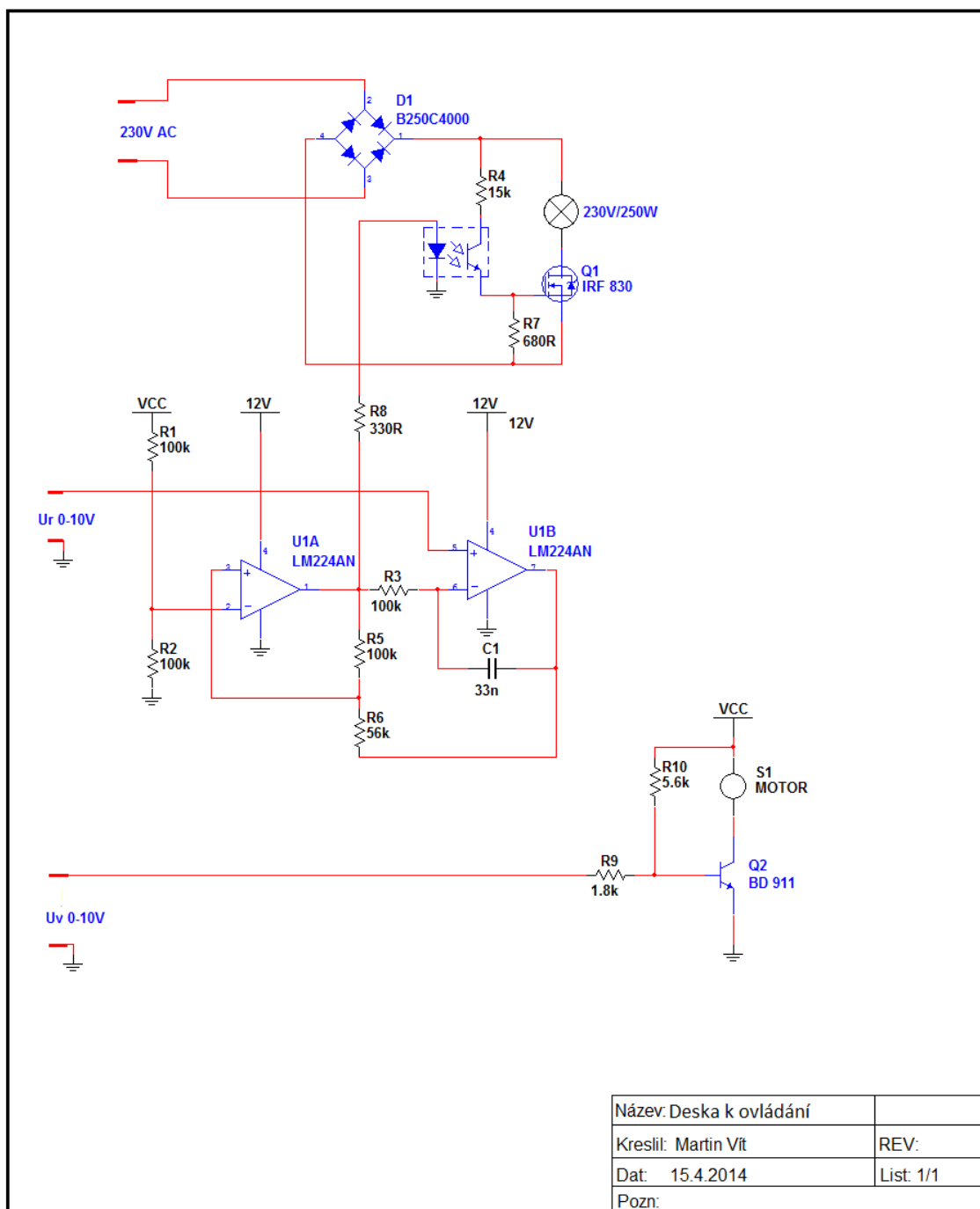
Z řady E12 zvolíme rezistor **1k8**

### 2.2.3 Řídicí díl

Ovládací deska je kombinací ovládání žárovek (kap. 2.2.1) a ovládání větráku (kap 2.2.2), výpočet součástek je proveden podle vzorců (2.1) až (2.4). Ovládání žárovek je navíc doplněno o zdroj stejnosměrného napětí 230 V, které tvoří usměrňovací můstek. Silové obvody jsou odděleny od řídicích optočlenem tak, aby nemohlo dojít k úrazu obsluhy při poruše nebo ke zničení ovládacího zařízení.



Obrázek 14: Plošný spoj řídicího dílu (strana součástek)



Obrázek 15: Schéma ovládání

## 2.3 Měření

### 2.3.1 Měření teploty

Měření teploty je realizováno pomocí elektrických čidel zapojených do můstku [5]. Signál z můstku je zesílen zesilovačem na úroveň 0-10 V k dalšímu zpracování.

Deska obsahuje 5 měřicích obvodů, z nichž 4 jsou pro čidlo PTC a jeden pro čidlo NTC. Všechny obvody reagují na zvyšující se teplotu receptoru vzrůstem výstupního napětí.

### 2.3.2 Měřicí díl

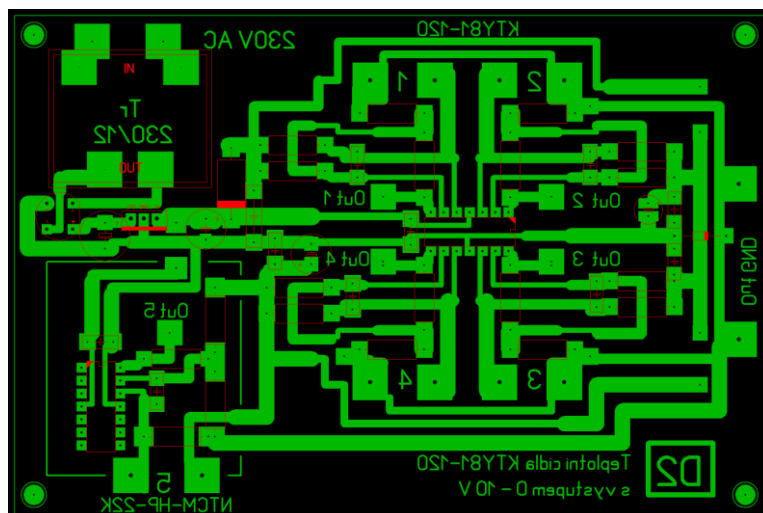
Základem měřicího dílu jsou dva integrované obvody LM224, které zastávají funkci zesilovačů. V každém z nich jsou obsaženy 4 operační zesilovače s příslušnými vývody. U IO1 jsou využity všechny 4 zesilovače pro zesílení signálu z PTC. U IO2 je obvod využit pouze z jedné čtvrtiny a to pro zesílení signálu z NTC.

Další důležitou součástí měřidla je měřicí můstek. Pro PTC jsou můstky sestaveny z rezistorů 1 k $\Omega$ , aby pro čidla 980  $\Omega$  byla zajištěna co největší citlivost. Z tohoto důvodu musí být můstky napájeny napětím 2V, aby nedošlo k zahřívání čidel protékajícím proudem. Proud je zvolen podle katalogové hodnoty 1 mA.

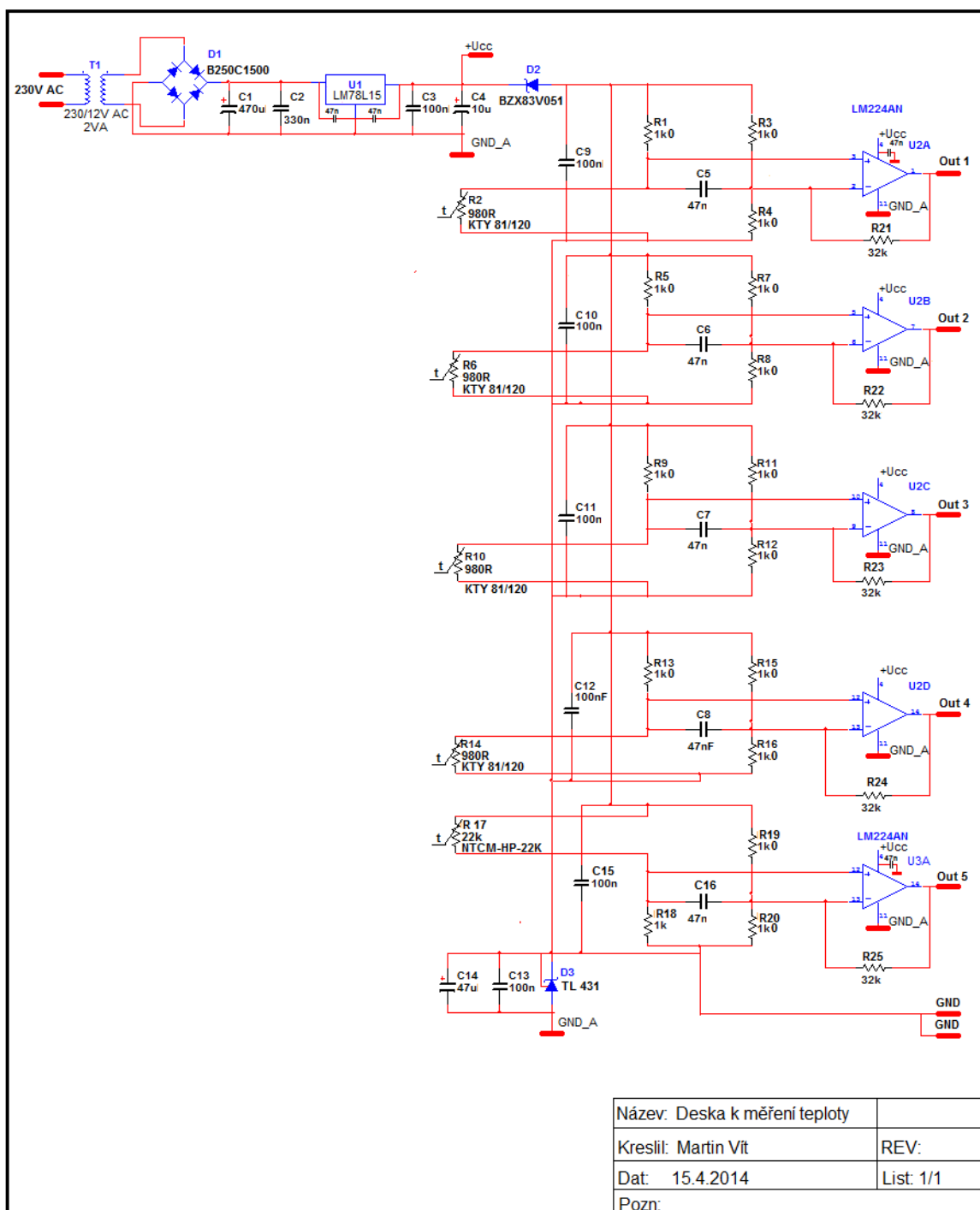
V můstcích pro PTC je čidlo umístěno ve spodní části můstku tak, aby s rostoucí teplotou výstupní napětí stoupalo. V můstku pro NTC je čidlo umístěno ve vrchní části můstku, aby výstupní napětí s rostoucí teplotou rovněž stoupalo.

Měřicí deska má vlastní napájecí zdroj z důvodu oddělení zemí všech obvodů. Pokud by se použilo napájení shodné se zbytkem zařízení, nebylo by možné kompenzovat nedokonalost otevřených OZ a nebylo by možné dosáhnout úrovně 0 V. Takto se napájecí napětí posunulo o 2,5 V níže, tím je tento nedostatek eliminován.

Tím ale vznikl další problém, a to nedostatečnost napájení 12 V. Pro správnou funkci je potřeba totiž nejméně 15 V. Z toho vyplynula nutnost dalšího zdroje. Zdroj je realizován miniaturním transformátorem do DPS o výkonu 2,5 VA a lineárním monolitickým stabilizátorem L7815 s příslušnými součástkami.



Obrázek 16: Plošný spoj měřicího dílu (strana součástek)



Obrázek 17: Schéma měřicího dílu

## 2.4 Konstrukce

### 2.4.1 Rozložení úlohy

Úloha je realizována na dřevotřískové desce o straně 420 mm. Na ní je připevněna plastová trubka o průměru 100 mm, která je pomocí 4 ohybů otočena celkem o 180°. Trubkou je vyplněn největší možný užitečný prostor na základní desce. Uprostřed vykrojení je umístěna řídicí a měřicí elektronika. Je zde umístěno také napájení všech elektrických součástí. Elektronika je umístěna v plastové elektroinstalační krabici ze samozhášivého materiálu.

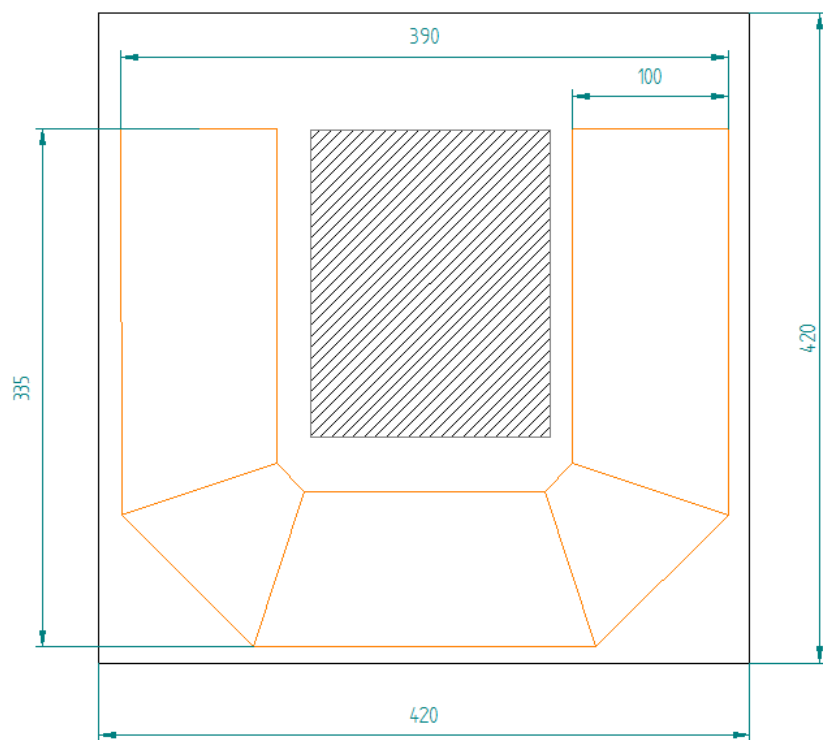
Trubka je k dřevotřískce připevněna pomocí instalačních objímek s gumovou vložkou určených k upevňování trubek (obrázek 18).



*Obrázek 18: Objímka pro uchycení trubky*

Úloha je navíc doplněná o 4 gumové nohy, které zajišťují její dobrou stabilitu a odolnost proti nechtěnému posunutí. Díky těmto nohám pod úlohou vzniká i dostatek místa na náročnou kabeláž.





Název: Základní rozměry	
Kreslil: Martin Vít	REV:
Dat: 15.4.2014	List: 1/1
Pozn:	

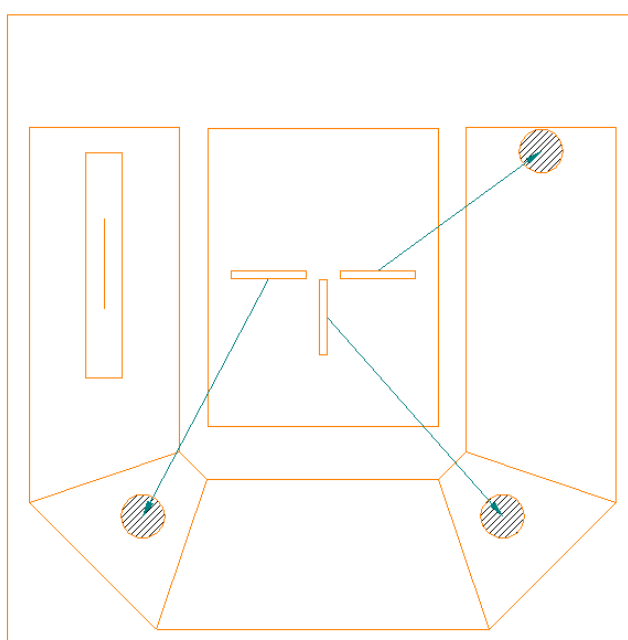
Obrázek 19: Základní rozměry úlohy

## 2.5 Vizualizace

### 2.5.1 Provedení

Protože teplota vzduchu není lidským okem rozpoznatelná, je potřeba realizovat jistý druh vizualizace teploty. Bylo rozhodnuto, že nejlepší variantou bude použití LED baru s indikací stavu napětí.

Není nutné vizualizovat všech pět měřených bodů. Teplota vstupního vzduchu se nemění, proto není nutné ji zobrazovat, stačí ji použít do případného matematického modelu. Druhým měřeným bodem, který nemá smysl zobrazovat je výstup z čidla NTC. Údaj z tohoto čidla pouze zdvojuje údaj z čidla PTC navíc s tou nevýhodou, že je značně nelineární. Vizualizace tedy probíhá pouze ve třech místech (obrázek 20).



Obrázek 20: Místa odběru dat pro vizualizaci teploty

### 2.5.2 Realizace

Realizace indikace úrovně napětí je provedena pomocí obvodu LM3914, speciálně k tomuto účelu určenému [6]. Obvod je realizován na desce plošného spoje, který tvoří zároveň základnu pod všemi třemi bargrafy.

Hlavní část zapojení je tvořena třemi obvody LM3914, které realizují funkci 3x10 komparátorů podle úrovně vstupního napětí. Obvod je doplněn o blokovací prvky a na příslušné polohy jsou umístěny součástky nastavující pracovní bod obvodu a režim činnosti. Každá část obvodu je pootočená o 90° a tvoří tak samostatný zobrazovací celek.

### 2.5.3 Výpočet součástek

Jako první bod vypočítáme rezistor R1. K výpočtu použijeme dokumentaci obvodu LM3914 [6].

$$I_{LED} \approx \frac{12,5}{R1} \quad (2.5)$$

Ze vztahu (2.5) vyjádříme R1 a obdržíme (2.6).

$$R1 \approx \frac{12,5}{I_{LED}} \quad (2.6)$$

Dosadíme-li za  $I_{LED}$  20 mA, vyjde nám hodnota 625  $\Omega$ . Nejbližší vyšší je podle řady E12 hodnota 680  $\Omega$ . Zvolíme proto tuto hodnotu. Při použití této hodnoty bude proud nastavený diodami 18,4 mA

Jako další bod následuje výpočet R2. K výpočtu opět použijeme dokumentaci obvodu LM3914 [6].

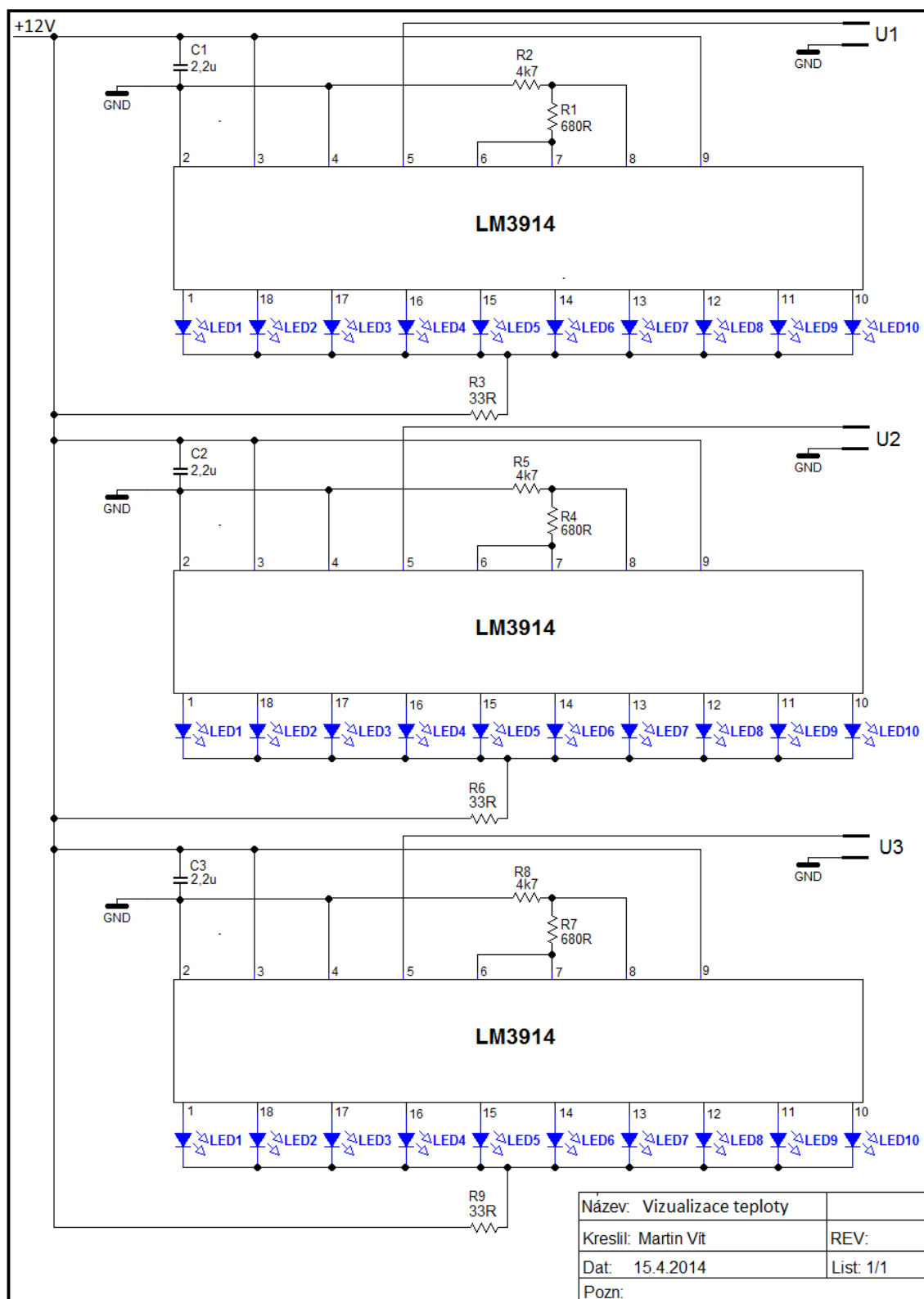
$$Ref_{Out} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (2.7)$$

Ze vztahu (2.7) vyjádříme R2 a obdržíme (2.8)

$$R2 = R1 \cdot \left(\frac{Ref_{Out}}{1,25} - 1\right) \quad (2.8)$$

Při předpokladu, že maximální vstupní napětí bude 10 V, po dosazení do tohoto vzorce (2.8) obdržíme hodnotu 4760  $\Omega$ . Nejbližší hodnotou z řady E12 je hodnota 4k7.

Zbývá ještě dořešit výkonové omezení integrovaného obvodu. 20ti pinový LM3914 má povolenou výkonovou ztrátu 1 W. Zohledníme-li, že každou diodou proteče proud 18,4 mA, je to při počtu deseti diod proud 184 mA. Při takto vysokém proudu nemůže být na obvodu napěťová ztráta větší než 5,4 V. Uvážíme-li, že na LED je napěťová ztráta zhruba 1,4 V, po dosazení do Ohmova zákona nám vyjde nejmenší možná hodnota omezovacího rezistoru 28,4  $\Omega$ . Podle řady E12 však nemůžeme zaokrouhlit k nejbližší možné hodnotě, neboť by při použití rezistoru 27  $\Omega$  zcela jistě došlo k přetížení budiče. Použijeme proto nejbližší vyšší hodnotu, kterou je 33  $\Omega$ .

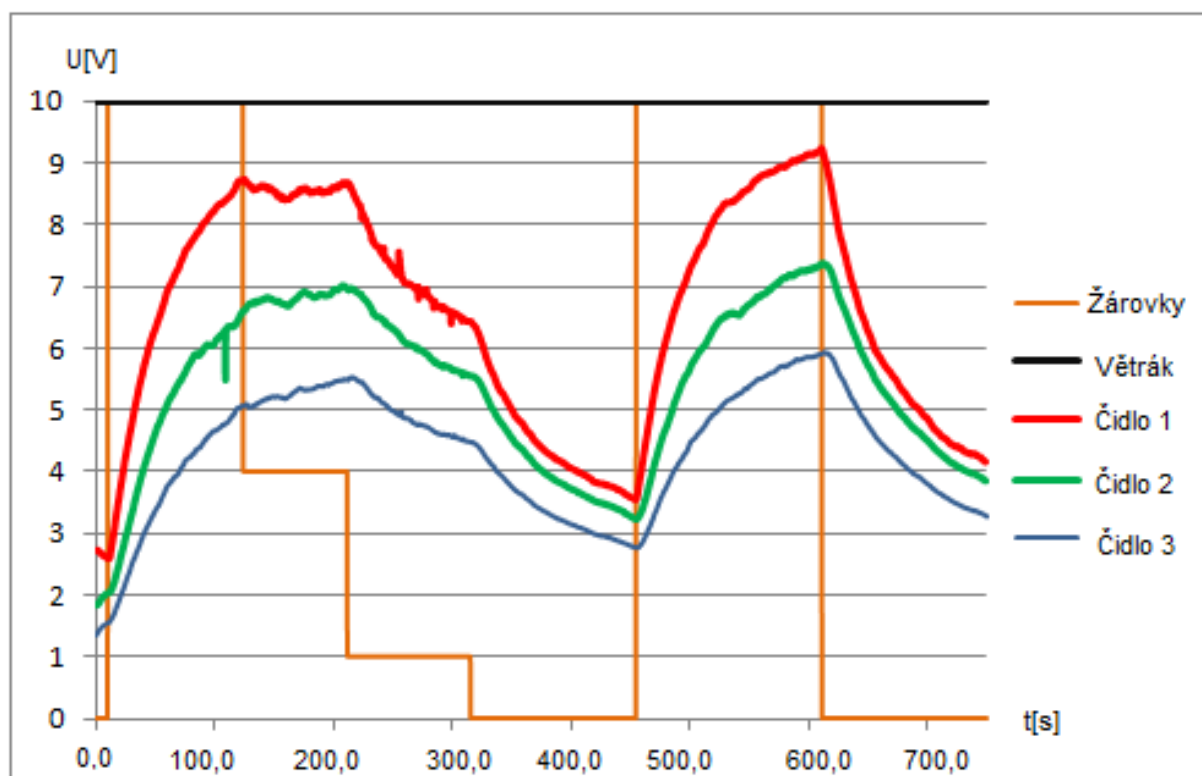


Obrázek 21: Zapojení LED zobrazovačů

## 3 Ověření činnosti

### 3.1 Ověření dynamiky systému

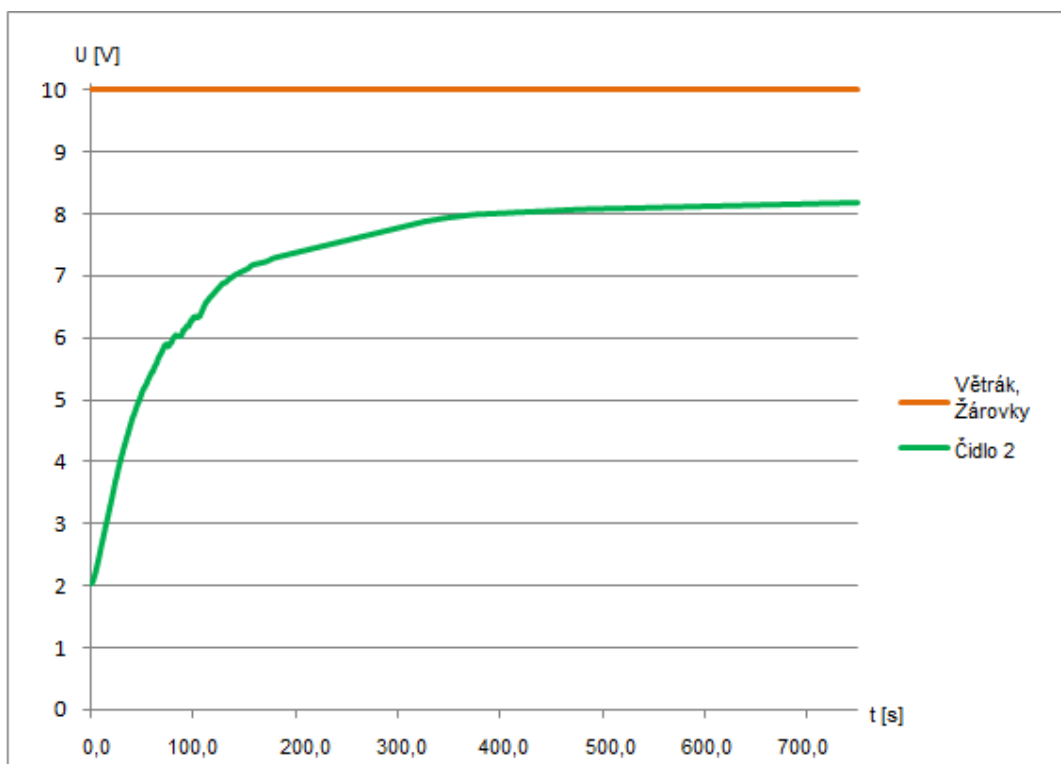
Po zkonstruování byl systém proměřen pro zjištění jeho přechodové charakteristiky (graf 1). Nejprve byla změřená obecná křivka se skokovými změnami vstupu pro ovládání výkonu žárovek. Výkon větráku byl ponechán plný, aby vzduch dobře proudil skrz trubku a neusazoval se na vrchní straně trubky, jak bylo naznačeno v kapitole 1.3.3.



Graf 1: Odezva systému na skokové změny výkonu topného tělesa

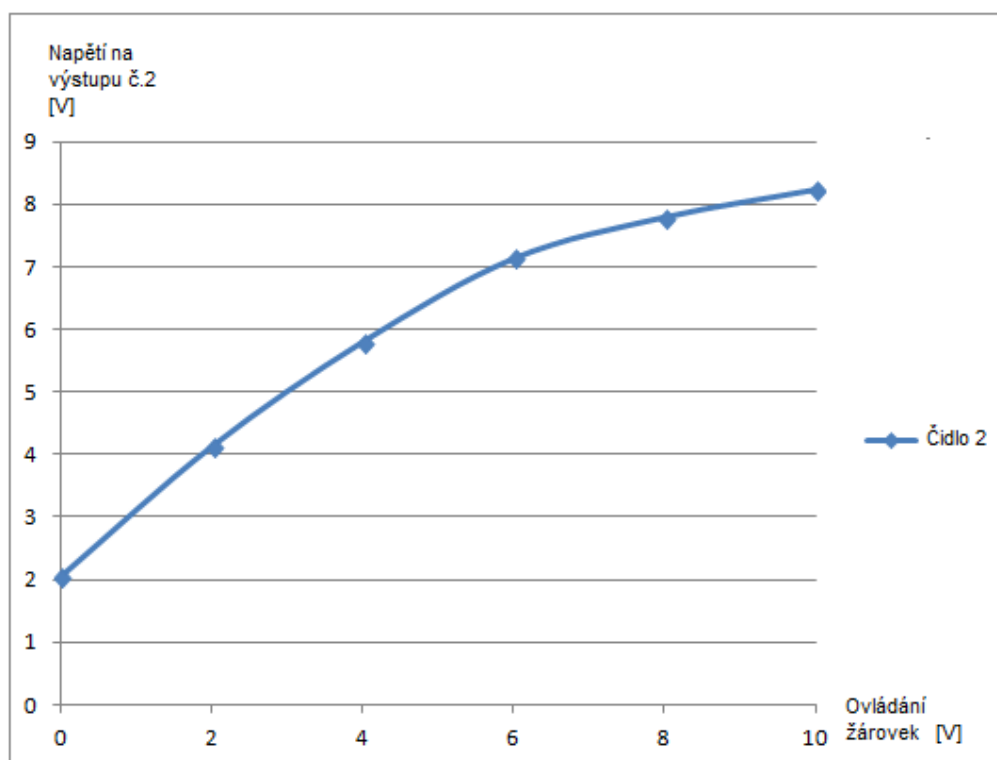
Pro lepší informaci byla naměřena i přechodová charakteristika, která trvala delší dobu, aby bylo možno zjistit statické vlastnosti po ustálení soustavy. Toto měření pro jednoduchost proběhlo jen na druhém čidle s plným výkonem topidel i větráku (graf 2).

U odezvy systému na změny výkonu topného tělesa probíhal odečet s periodou 0,5 s, u odezvy systému na jednotkový skok pak s periodou 1 s. U statické charakteristiky byla doba odečtu jednotlivých hodnot 30 minut.



*Graf 2: Odezva systému na jednotkový skok*

Pro lepší představu byla ještě změřena v pěti bodech statická charakteristika systému-opět na čidlo č. 2. Měření statické charakteristiky, bylo časově náročné, proto je počet bodů mnohonásobně nižší, než u dynamické charakteristiky (graf 3).



*Graf 3: Statická převodní charakteristika systému*

### 3.2 Výsledné zpracování

Na obrázku 22 je zobrazen celkový pohled na úlohu. Úloha je sestavena na dřevotřískové základní desce, přičemž soustava je tvořena plexi trubicou. Ve zbylém místě ve vykrojení trubky je umístěna elektronika s vizualizací. Na vstupní straně trubky je osazen větrák a soustava žárovek, která slouží k ohřevu vzduchu. Detail této soustavy halogenových žárovek je zobrazena na obrázku 25.



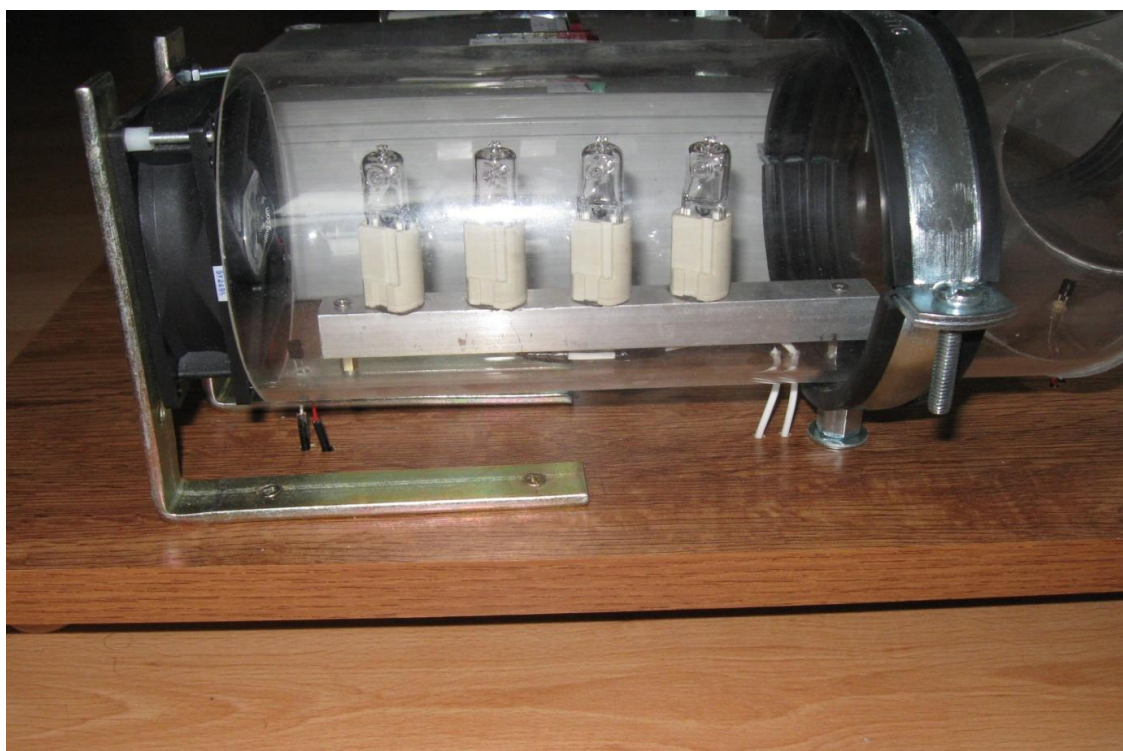
*Obrázek 22: Celkový pohled na úlohu*

Na obrázku 24 je předpokládaný pohled na úlohu, který by mohl být zprostředkován kamerou v projektu iLab, pro kterou je nutné zajistit vizualizaci úlohy. V levé části úlohy je umístěna svorkovnice, která umožní propojení úlohy s řídicím systémem.





Obrázek 23: Pohled na úlohu shora



Obrázek 24: Detail provedení topidla



## 4 Závěr

### 4.1 Porovnání výsledku se zadáním

#### **Proved'te návrh laboratorní úlohy „teplota v trubce“**

Po studiu podobných úloh, nových dostupných součástek a požadavků vyučujících na funkci zařízení, se mi podařilo navrhnout úlohu splňující většinu požadavků. Rozmístění prvků jsem zvolil obdobně, jako u úlohy, která inspirovala požadavek na tuto práci. V několika bodech, jako je například umístění a počet čidel, konstrukce kolen a tvorba obalu soustavy se tato úloha liší.

#### **Vyberte vhodné součástky pro realizaci**

Součástky jsem vybral dílem z doporučení a dílem z požadavků na jejich činnost. Pro zajímavost mi bylo vedoucím práce doporučeno čidlo NTC. Jako hlavní měřicí čidlo jsem zvolil čidlo PTC KTY81-120. Jako akční členy jsem zvolil halogenové žárovky pro svoji názornou ilustraci vyzářeného výkonu. Větrák jsem zvolil s ohledem na poměr parametrů tlaku vzduchu a množství vzduchu.

#### **Zkonstruujte laboratorní úlohu**

Úlohu jsem zkonstruoval na pevné základní desce v domácích podmínkách s minimálním použitím speciálních nástrojů. Ke konstrukci jsem použil standardizované konstrukční prvky jako např. metrické normované šrouby a žárovky s patičkami splňujícími DIN. Nepříjemnou vlastností takového postupu je, že není možné dosáhnout 100% využití všech vložených prostředků. Některé součástky byly při konstrukci zničeny. Plošné spoje jsem navrhnul ve volně dostupné verzi programu Sprint Layout.

#### **Ověřte funkčnost úlohy**

Úlohu jsem ověřil v laboratorním prostředí provozem se změnou i beze změny vstupních parametrů. Výsledky jsem zhodnotil subjektivním odhadem i měřením na zobrazených grafech. Odhadnul jsem, že tato úloha splňuje požadavky, které na ní jsou kladeny jako na výukový přípravek.

### 4.2 Přínos úlohy

Úloha bude sloužit v předmětech zabývajících se měřením, řízením a regulací. Studenti si na ní budou moci procvičit úlohy související s řízením a regulací dynamických soustav.

Případné rozšíření úlohy by se mohlo týkat například sofistikovanějšího měření průtoku vzduchu. K tomuto měření by mohlo být užito měřidlo se žhaveným drátkem, mechanický deformační tlakoměr, nebo jiná vhodná metoda. Množství protékajícího vzduchu je pro přesné nastavení regulátoru v tomto případě důležité.

# Seznam použité literatury a dalších pramenů

- [1] MIKULČÁK, Krkavec, Klimeš. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. 7. Vyd. SVOBODA, 1976, 352 s. , 1197 14-057-76.
- [2] Koncepce úlohy: [online] 20. 3. 2010 [7. 1. 2013] dostupné z: [http://home.hit.no/~finnh/air\\_heater/](http://home.hit.no/~finnh/air_heater/)
- [3] DIEDRICH, Kurt. *Elektronika tajemství zbavená: objevovat, experimentovat, porozumět*. 1. čes. vyd. Překlad Miroslav Hrdina. Ostrava: HEL, 2004, 207 s. ISBN 80-861-6724-0.
- [4] Konstrukce tranzistorového zesilovače: [online] 27. 4. 2013 [30. 4.2013] dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/transistor-spice-model-a-navrh-se-stupne-ve-tride-a.html>
- [5] *Senzory a převodníky*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 136 s. ISBN 80-010-3123-3.
- [6] Dokumentace LM3914: [online] 2013[1.3. 2014] dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3914.pdf>
- [7] PLÍVA, Z., J. DRABKOVÁ, J.KOPRNICKÝ a L.PETRŽÍLKA. *Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací*. 2. Upravené vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, FM, 2014. ISBN 978-80-7494-049-1

## Přílohy

### Příložený CD-ROM

Příložený CD-ROM obsahuje práci ve formátu pdf a výkresovou dokumentaci pro výrobu plošných spojů ve formátu pdf.